

Л.Б. ЖОРНЯК, О.І. АФАНАСЬЄВ, В.М. СНИГІРЬОВ, С.В. СКОРИК, Д.В. ЧОРНИЙ, С.І. БЕЛЯЄВ

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСОБІВ ПРИМУСОВОГО ВИРІВНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Пропонується методика оцінки розподілу напруженості поля уздовж опорної ізоляційної покривки газонаповнених трансформаторів струму. Ця методика дозволяє оцінити ефективність примусового розподілу напруженості за допомогою конденсаторних обкладок шляхом зміння їх конструктивних параметрів. У запропонованому методі розглядається ізоляційна покривка, головним регулюючим елементом схеми заміщення якої обрані еквівалентні ємності окремих частини покривки з урахуванням ємності циліндричного конденсатора і ємності до центральної труби виводів. Таким чином зроблено висновок щодо можливості покращення розподілу напруги та зменшення неоднорідності електричного поля шляхом регулювання структури конденсатора.

Ключові слова: розподіл напруженості поля, ізоляційна покривка, схема заміщення, часткова та еквівалентна ємності, конденсаторні обкладки, циліндричний конденсатор.

Л.Б. ЖОРНЯК, А.И. АФАНАСЬЕВ, В.М. СНИГИРЁВ, С.В. СКОРИК, Д.В. ЧОРНЫЙ, С.И. БЕЛЯЕВ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБОВ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВЫРАВНИВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Предлагаются методика оценки распределения напряженности поля вдоль опорной изоляционной покрывки газонаполненных трансформаторов тока. Эта методика позволяет оценить эффективность принудительного распределения напряженности с помощью конденсаторных обкладок путем изменения их конструктивных параметров. В предложенном методе рассматривается изоляционная покрывка, главным регулирующим элементом которой выбраны эквивалентные емкости отдельных частей покрывки с учетом емкости цилиндрического конденсатора и емкости к центральной трубе выводов. Таким образом сделан вывод о возможности улучшения распределения напряжения и уменьшения неоднородности электрического поля путем регулирования структуры конденсатора.

Ключевые слова: распределение напряженности поля, изоляционная покрывка, схема замещения, частичная и эквивалентная емкости, конденсаторные обкладки, цилиндрический конденсатор.

L.B. ZHORNIAK, A.I. AFANASIEV, V.M. SNIGIREV, S.V. SKORYK, D.V. CHORNYI, S.I. BIELIAIEV

POSSIBILITY OF ELECTRIC FIELD COMPENSATION OF EXTERNAL ISOLATION OF HIGH-VOLTAGE GAS-INSULATED CURRENT TRANSFORMERS

There have been proposed methods of intensity distribution regulation along external isolator of gas-filled current transformers. This method allows us to estimate the efficiency of the distribution of forced voltage using capacitor plates by changing their design parameters. On the structure of the tire there is a cavity, where the internal passage of the current carrying the particles and grounded elements of the design of the transformer current. Such a constructive solution enhances the distortion of the electric field and forms a sharp uneven voltage distribution and field strength along the insulation structure. In the offered methods the column from sequentially connected insulators is considered, the principal circuit elements of substitution selected a certain capacity of a separate part of the reference isolation center and its partial capacities on the earth and conductive elements. Thus, we can say that to improve the voltage distribution and reduce the heterogeneity of the electric field by controlling the structure of the capacitor. Different variants of constructive decisions for forced equalization of voltage distribution are analyzed, especially in the upper part of the tire near a powerful electrode. The structure analysis showed that the following structural parameters influence on the distribution of capacitance and field strength along the capacitor height: the length of the overlap of the capacitor plates, the length of the capacitor plates and the distance between the individual capacitor plates. The results of the preliminary estimation of the field intensity distribution are shown in the figure. On the basis of this methodology, software was developed that allows us to estimate the strength of the field at individual points along the height of the cylindrical condenser. Thus, it was concluded a possibility of improving of intensity distribution regulation and reduction of non-uniformity of an electric field.

Keywords: intensity distribution, external isolator, semiconductor covering, screen, capacity.

Вступ. В апаратах зверх високої напруги найважливішим елементом конструкції є електрична ізоляція, яка впливає як на конструкцію, так і на експлуатаційну надійність. В цих умовах має місце нерівномірний розподіл електричного навантаження на опорну ізоляційну конструкцію, функцію якої у газонаповнених трансформаторах струму виконує ізоляційна покривка [1, 2]. Особливість структури покривки така, що вона виконується пустотілою, де всередині проходять струмоведучі частини та заземлені елементи конструкції трансформатора струму. Таке конструктивне рішення підсилює спотворення електричного поля і утворює різку нерівномірність розподілу напруги та напруженості поля уздовж ізоляційної конструкції, як показано на рис. 1. Це особливо виникає в зоні електрода з високим потен-

ціалом, роль якого виконує сталевий бак, в середині якого розміщується активна частина трансформатора в середовищі електричного газу з надлишковим тиском.

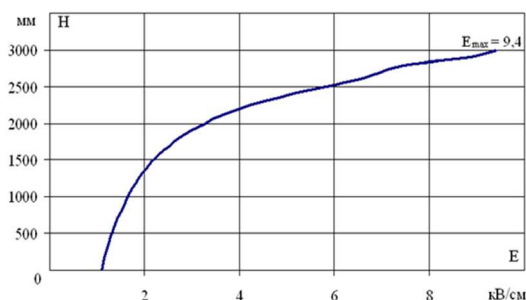


Рис. 1. Розподіл напруженості електричного поля уздовж поверхні ізоляційної покривки без застосування способів вирівнювання електричного поля

Мета роботи. З метою зниження енергоспоживання при виготовленні сучасні газонаповнені трансформатори струму мають ізоляційну покришку у вигляді комбінованого ізолятора, який складається з ізоляційного циліндра, армованого склопластиком з наплавленими силіконовими ребрами. Головним недоліком такої конструкції є знижена в зрівнянні з фарфором робоча напруженість поля, яка не повинна перевищувати (6...7) кВ/см [1]. Крім того, в умовах дії комутаційних та атмосферних перенапруг напруженість поля може тимчасово суттєво перевищувати припустиме значення з виникаючими з цього негативними наслідками [4].

В такому випадку удосконалення системи примусового вирівнювання розподілу напруги та напруженості поля грає важливу роль для подальшого підвищення експлуатаційної надійності як самої ізоляційної конструкції, так і трансформатора струму в цілому [3].

В ізоляційній покришці, що розглядається, примусове вирівнювання розподілу напруженості по висоті здійснюється за допомогою внутрішніх конденсаторних обкладок [5, 6], які конструктивно утворюють так званий конденсатор. Дослідження, що проведені в [5] показали, що для оцінки розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної покришки газонаповнених трансформаторів струму такої структури складається схема заміщення, що показана на рис. 2, де використовують такі позначення:

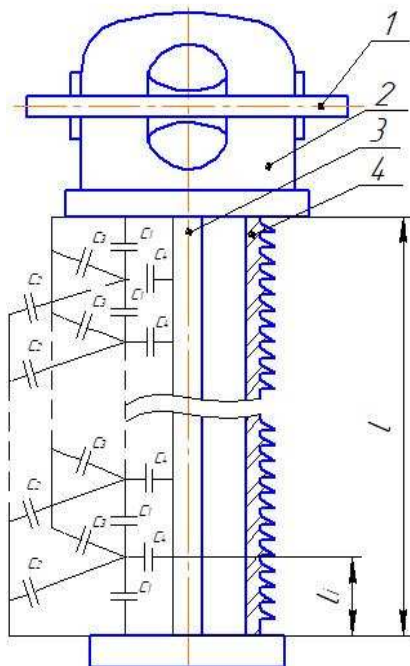


Рис. 2. Еквівалентна ємнісна схема заміщення ізоляційної покришки трансформатора струму

C_1 – особиста ємність елемента покришки, на якій умовно поділяється вся ізоляційна конструкція. Її числове значення можливо уявити як ємність циліндричного конденсатора за умовою [4]

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon l_i}{\ln \frac{R_3}{R_b}}, \quad (1)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність матеріалу діелектрика;

l_i – висота елемента ізоляційної покришки;

R_3, R_b – відповідно зовнішній та внутрішній радіуси циліндричної покришки;

C_2 – ємність елемента покришки по відношенню до землі;

C_3 – ємність елемента покришки по відношенню до частин конструкції, що знаходяться під напругою;

C_4 – ємність елемента по відношенню до центральної труби, в якій розміщені виводи низької напруги. Її величина визначається як еквівалентна ємність з урахуванням ємності циліндричного конденсатора на основі умови (1).

Оскільки ємності $C_1...C_3$ у конкретній конструкції трансформатора струму відносно стабільні, то подальше примусове вирівнювання розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної покришки можливо отримати за рахунок регулювання ємності C_4 . Цього можливо досягнути шляхом змінення конструктивних параметрів та структури циліндричного конденсатора. У загальному вигляді розрахунок регулювання поля за допомогою конденсаторних обкладок здійснюється на основі методики [4]. Необхідна ємність конденсатора C_4 може бути визначена за умовою

$$C = \frac{i_c}{2\pi f U_{роз}} \quad (2)$$

$$U_{роз} = U_p K_3 K_n$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, що дорівнює 1,1 [4];

K_n – коефіцієнт, що враховує перенапруги, дорівнює 1,1;

i_c – ємнісний струм у конденсаторі, величина якого обирається 0,01 А.

Для зменшення геометричних розмірів і витрат матеріалів конденсаторні обкладки виконуються у вигляді зигзагу, який розбивається на чотири зони, в кожній знаходиться рівна кількість елементів з трьома переходами напрямку зигзагу, як показано на рис. 3.

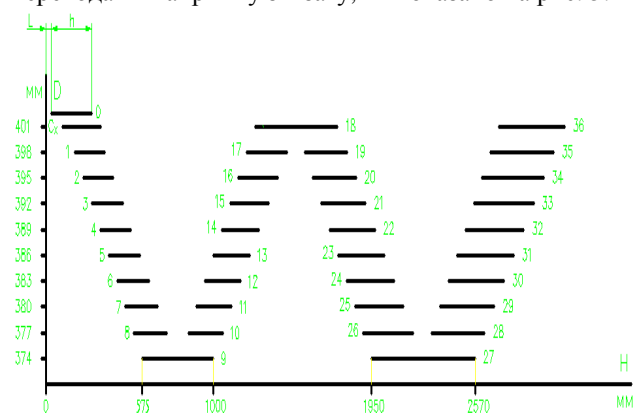


Рис. 3 Структура накладення конденсаторних обкладок на ізоляційний циліндр за схемою зигзаг

Середня ємність елемента конденсатора визначається з урахування приймаємого припущення, що взаємний вплив ємностей відсутній

$$C_{\text{ср}} = nC,$$

де n – кількість конденсаторних обкладок у структурі конденсатора.

Намотування конденсаторів здійснюється на склопластиковий циліндр, розміри якого визначаються типом трансформатора струму. Наприклад, для трансформатора типу ТОГ-362 його зовнішній діаметр $D_{\text{зц}}$ складає 70 мм і конструкційна довжина $l_{\text{ц}}$ складає 3000 мм. Величина перекриття між нульовою та першою обкладками складає

$$l_x = \frac{U_{\text{нр}} C \ln \frac{R_0}{R_1}}{U_x 2\pi\epsilon},$$

$$R_0 = \frac{D_{\text{зц}}}{2} + t_{\text{із}} \frac{n}{4},$$

$$R_1 = \frac{D_{\text{зц}}}{2} + t_{\text{із}} \left(\frac{n}{4} - 1 \right),$$

де $t_{\text{із}}$ – товщина ізоляції між обкладками, мм;

U_x – напруга на обкладці, кВ;

ϵ – діелектрична проникність ізоляційного матеріалу, що використовується для виготовлення конденсатора.

Для проведення подальших досліджень розподілу напруженості поля в якості першого наближення обирається умова, щоб ємність зростала від нульової обкладки до останньої за експоненціальним законом. В цьому випадку повинна виконуватися умова

$$L_{n-1,n} = l_1 e$$

Відстань між обкладками одного діаметру в місці переходу зигзагу обирається з умови, щоб допустима напруженість поля у продольному напрямку не перевищувала 1,2 кВ/м.

Ширина перекриття рядом розташованих обкладок визначається з умови

$$l_{x,x-1} = L_{x-1} + H_{\text{об.х}} - L_x,$$

де L_{x-1} – відстань від бази до початку попередньої обкладки;

$H_{\text{об.х}}$ – ширина попередньої обкладки;

L_x – відстань від бази до початку подальшої обкладки.

Величина ємності між обкладками

$$C_x^{x-1} = \frac{2\pi\epsilon l_{x,x-1}}{\ln \frac{R_x}{R_{x+1}}},$$

де R_{x+1} , R_x – відповідно радіуси перед неї та подальшої конденсаторних обкладок.

Падіння напруги між обкладками визначається

$$\Delta U_{x,x-1} = \frac{U_{\text{нр}} C_{\Sigma}}{C_x^{x-1}}$$

Величина C_{Σ} обирається за умовою

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \sum_{0,1}^{n-1,n} \frac{1}{C_x^{x-1}}$$

Напруженість поля між обкладками

$$E_x^{x-1} = \frac{\Delta U_{x,x-1}}{R_{x-1} \ln \frac{R_x}{R_{x-1}}}$$

Величина ємнісного струму в конденсаторі визначиться з умови

$$i_c = U_{\text{н}} 2\pi f C_{\Sigma}$$

На основі вище приведеної методики розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє оцінити напруженість поля в окремих точках по висоті циліндричного конденсатора з урахуванням впливу геометричних розмірів окремих елементів, що утворюють структуру цього конденсатора. Результати попередньої оцінки розподілу напруженості поля з урахуванням схеми заміщення рис. 2 та впливу конденсатора, який встановлюється в конструкції трансформатора типу ТОГ-362 виробництва КО Запорізький завод високовольтної апаратури [16] показані на рис. 4.

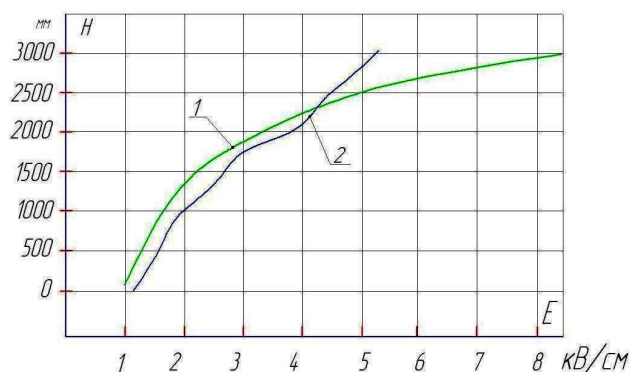
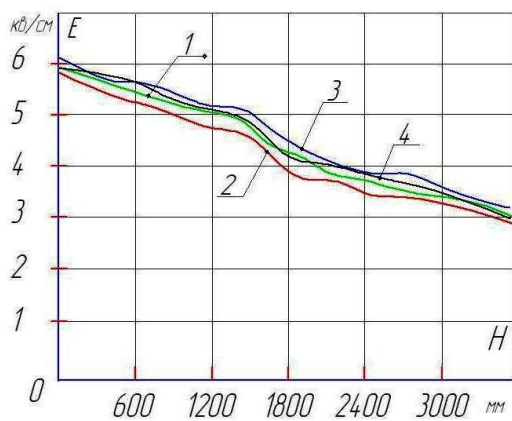


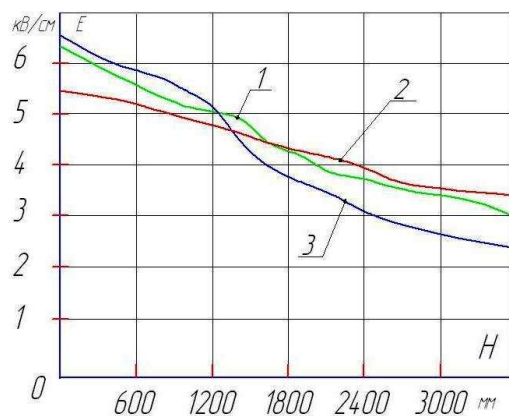
Рис. 4. Ефективність використання конденсатора зі стандартними параметрами

Як показують дані рис. 4, використання конденсаторних обкладок для примусового вирівнювання розподілу напруженості поля дозволяє отримати суттєвий ефект по зниженню напруженості поля і електричного навантаження на покриття в зоні електрода з високим потенціалом. Подальшого вирівнювання напруженості можливо досягнути за рахунок оптимізації конструкції самого конденсатора. Крім того, при зростанні номінальної напруги, наприклад у трансформаторі типу ТОГ-525, структура конденсатора суттєво ускладнюється і оптимізаційні розрахунки в цих умовах є вельми актуальні.

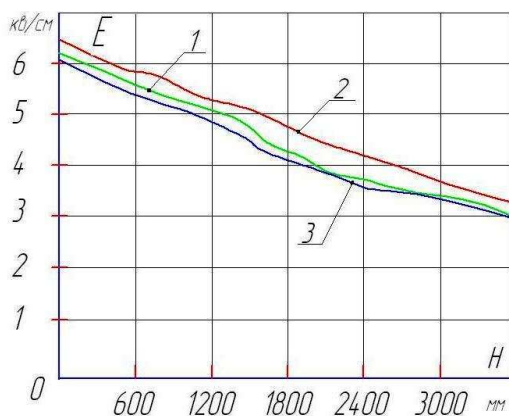
Як показує аналіз структури конденсатора, на розподіл ємності та напруженості поля уздовж його висоти оказують вплив такі конструктивні параметри, як довжина перекриття конденсаторних обкладок, довжина конденсаторних обкладок, а також відстань між окремими конденсаторними обкладками (див. рис. 3). Результати розрахунків по оцінці впливу цих параметрів на розподіл напруженості, які здійснені на основі вище приведеної методики, показано на рис. 5. Згідно проведених розрахунків найбільш неоднорідний розподіл напруженості має місце в зоні верхнього електрода, яким є бак трансформатора. Тому подальший аналіз буде здійснюватися для верхньої частини поверхні покриття. Аналіз графіків рис. 5,а показує, що змінням довжини перекриття конденсаторних обкладок не оказує суттєвого впливу на зниження електричного навантаження.



а



б



в

Рис. 5. Вплив окремих конструктивних параметрів конденсатора на розподіл напруженості поля уздовж покриття у трансформаторі струму типу ТОГ-363: а – вплив довжини перекриття обкладок; б – вплив кількості обкладок; в – вплив відстані між обкладками.

Але його реалізація не потребує суттєвих додаткових витрат матеріалів. Тому його можливо використовувати як додатковий засіб по зниженню напруженості поля.

Аналіз впливу кількості обкладок рис. 5, б показує, що підвищення кількості обкладок може суттєво впливати на зниження напруженості поля. Для зменшення витрат матеріалів можливо

виготовляти конденсатор не монолітним, а таким що складається з двох частин, що актуально в умовах більш високих номінальних напруг.

Вплив відстані між обкладками рис. 5, в показує, що цей засіб регулювання напруженості поля менш ефективний і його можливо використовувати як додатковий з урахуванням конструктивних особливостей. Наприклад матеріалоемності і електричного навантаження ізоляції між обкладками.

Висновки. Попередній аналіз та результати проведених розрахунків дають можливість стверджувати, що для конкретної конструкції газонаповненого трансформатора струму величини часткових еквівалентних ємностей $C_1...C_3$ для ізоляційної покриття відносно стабільні та їх регулювання потребує суттєвих конструктивних рішень. Більшого ефекту що до зменшення нерівномірності розподілу напруги можливо досягнути змінюючи величину часткової ємності C_4 , яку в основному формує циліндричний конденсатор. Змінням його конструктивних параметрів можливо в достатньо широких межах регулювати розподіл напруженості уздовж ізоляційної покриття. Для проведення необхідних розрахунків розроблено алгоритм та необхідне для його реалізації програмне забезпечення, яке дає можливість спроектувати конденсатори для трансформаторів на більш високі класи напруги.

Ефективність впливу конструктивних чинників можна показати на рис. 6 при умові зміння ємності окремих елементів покриття у верхній її частині, де має місце найбільш неоднорідний розподіл напруги. Дані досліджень показують, що найбільший ефект можливо отримати при оптимальній структурі конденсатора як показує крива 5, що дозволяє знизити напруженість поля до 20%.

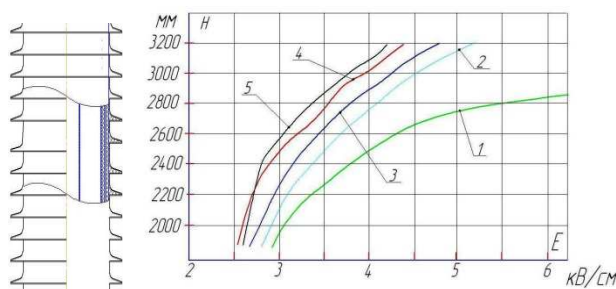


Рис. 6. Ефективність впливу зміння параметрів конденсатора на розподіл напруженості уздовж ізоляційної покриття: 1 – без використання конденсатора; 2 – зі стандартним конденсатором; 3 – зміння перекриття обкладок; 4 – змінням кількості обкладок; 5 – оптимальній кількості обкладок і перекриття

Більш точного визначення впливу вищезазначених методів регулювання розподілу напруги можна досягти проведенням додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань.

Список літератури

1. Александров, Г.Н. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения: учеб. / Г. Н. Александров, В.Л. Иванов. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
2. Афанасьев, В.В. Трансформаторы тока: учеб. / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
3. Жорняк, Л.Б. К вопросу об улучшении качества внутренней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов [Текст] / Л.Б. Жорняк, О.Г. Волкова, М.А. Макогон // Вісник Національного технічного університету ХПИ, 2017 - №34(1256) – с. 19-25.
4. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 446 с.
5. Дмитриевский, В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. / В. С. Дмитриевский. – М. : Энергоиздат, 1981. – 392 с.
6. Жорняк, Л.Б. Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму [Текст] / Л.Б. Жорняк, Л. Афанасьєв, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». – 2017. – № 34 (1256) – С. 14-18.
7. Колечицкий, Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Е. С. Колечицкий. – М. Энергоиздат, 1983. – 168 с.
8. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения: учеб. / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
9. Полтев, А. И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения: учеб. / А. И. Полтев. – Л. : Энергия, 1979. – 240 с.
10. Полтев, А. И. Элегазовые аппараты: учеб. / А. И. Полтев. – Л. : Энергия, 1978. – 240 с.
11. Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения / В. Я. Ушаков. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
12. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. – Введ. 1997-04-12. – М. : Издательство стандартов, 1997. – 50 с.
13. ГОСТ 7746-2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия. – Введ. 2002-03-13. – М. : Издательство стандартов, 2002. – 33 с.
14. ОАО ВО «Электроаппарат» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ea.spb.ru>
15. Trenchcompany [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.trenchgroup.com/en>
16. КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.

References (transliterated)

1. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L. Insulation of high-voltage electric apparatus: Proc. L.: Energoatomizdat, 1984. 208 p.
2. Afanasyev V.V., Adoniev N.M., Cibiel V.M. Current transformers: Proc. L.: Energoatomizdat, 1989. – 416 p.
3. Zhorniak L.B., Volkova O.G., Makohon M.A. To the question of improving the quality of internal insulation of high-voltage measurement transformers. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. No. 34 (1256). P. 19–25.
4. Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pintal Y.S. Technique of high stresses. Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 446 p.
5. Dmitrevsky V.S. Calculation and design of electrical insulation: Proc. Moscow: Energoizdat, 1981. 392 p.
6. Zhorniak L.B., Afanasiev A.I., Leonov R.S., Karpuk A.V. The possibilities of compensating the electric field strength of external insulation of high-voltage gas-filled current transformers [Tekst]. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPI». 2017. No 34 (1256). Pp. 14 - 18.
7. Kolechitsky E.S. Calculation of electric fields of high-voltage devices. Moscow. Energoizdat, 1983. 168 p.
8. Kuchinsky G.S., Kizevetter V.E., Pintal Y.S. Insulation of high voltage installations: Proc. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 368 p.
9. Poltev A.I. Designs and calculation of high-voltage SF6 apparatus: Proc. – L.: Energy, 1979. – 240 p.
10. Poltev A.I. Elegazoapparaty: training. L.: Energy, 1978. 240 p.
11. Ushakov V.Y. Insulation of high voltage installations. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 496 p.
12. GOST 1516.3-96 AC electrical equipment for voltage from 1 to 750 kV. Enter. 1997-04-12. Moscow: Publishing house of standards, 1997. 50 p.
13. GOST 7746-2001 Current transformers. General specifications. Enter. 2002-03-13. Moscow: Publishing house of standards, 2002. 33 p.
14. JSC VO "Electroapparat" [Electronic resource]. Access mode: <http://www.ea.spb.ru>
15. Trenchcompany [Electronic resource]. Access mode: <http://www.trenchgroup.com/en>
16. KO "Zaporozhye plant of high-voltage equipment" [Electronic resource]. Access mode: <http://www.zva.zp.ua>.

Надійшла (received) 05.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Жорняк Людмила Борисівна (Жорняк Людмила Борисовна, Zhorniak Liudmyla) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua.

Афанасьєв Олексій Іванович (Афанасьєв Алексей Иванович, Afanasiev Alexej) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Снігірьов Віталій Максимович (Снигирёв Виталий Максимович, Snigirev Vitalii) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Скорик Світлана Володимирівна (Скорик Светлана Владимировна, Skoryk Svetlana) – Запорізький національний технічний університет, студентка кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Чорний Денис Вадимович (Чорный Денис Вадимович, Chorny Denys) – Запорізький національний технічний університет, студент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.

Беляєв Сергій Іванович (Беляев Сергей Иванович, Bieljaiev Serhii) – Запорізький національний технічний університет, студент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна.